不等流場を遡る波状段波の変形過程に関する水理実験

An Experimental Study on UndularBore Formation in Non-uniform flow

北海道大学工学部土木工学科	学生	員	中村 祐介	(Yusuke Nakamura)
寒地土木研究所	正	員	安田 浩保	(Hiroyasu Yasuda)
北海道大学工学研究科	ΤĒ	員	清水 康行	(Yasuyuki Shimizu)

1.はじめに

地震によって発生した津波が河川へ浸入すると,越流 氾濫や堤防流失,それによって引き起こされる2次災害 など甚大な被害が想定される.そうした観点から見て, 津波が河川に浸入した際にどのような挙動を示すのかを 知ることは、工学上非常に有益であると考えられる.近 年の事例を挙げるならば,2003年に発生した十勝沖地震 の際,複数の河川への地震津波の浸入と波状段波の形成 が観測され,これを契機に,津波の河川遡上に伴う危険 性が認識されるようになった¹⁾.

波状段波に関する研究は,静水場においてゲートを急 開させるなどによって段波を発生させた場合について, Favre²⁾ Keulegan & Patterson³⁾ Johnson⁴⁽⁵⁾ Peregrine⁶⁾, 室田⁷⁾,松富⁸⁾などが実施している.これらの研究による と,波頭部において局所的な水位上昇を伴う波状段波が 形成され,入射時の水位と比較して約2倍程度にまで水 位が上昇することが指摘されている.但し,このような 波状段波が流れを遡るような場合の議論にまでは達して いない.また,流れを遡る波動に関しての理論解析は佐 藤⁹などが実施している.

しかし,いずれの解析も静水圧近似の条件下での解析 であり,流下方向にFr数が漸変するような不等流場およ び急勾配河川などの高Fr数の条件下での知見は乏しい. 最近になり安田ら¹⁰は,ゲートが急閉された場合に生じ る波状段波が疑似等流場を遡上する問題に関する水理実 験を実施し,波頭部における波の変形に伴う水位上昇の 規模が1.8 倍程度にまで達することを示した.

こうした実情を踏まえ,本研究では波長の長い波動が 実河川を模擬した不等流を遡る水理実験を行った.実験 では,特に流れを遡る波状段波の変形過程や,その形成 に伴う水位上昇の規模を明らかにすることに着目した.

2.水理実験

2.1 実験装置の概要

本実験で使用した実験装置は,図-2に示した全長34m, 全幅0.5mの矩形断面水路に変更を加えたものである. 下流端から6mの区間は固定勾配区間で,そこから28m の区間は水平から無段階に水路勾配を変化させることが できる.但し,上流端から2mの区間には整流のために 緩衝材を設置した.

今回の変更点は,固定勾配区間と勾配可変区間の境界

Q [/s]	T_t [s]	η_{ts} [m]		Q [/s]	T_t [s]	η_{ts} [m]	Ç	2[/s]	T_t [s]	η_{ts} [m]
	5.00	0.015			5.00	0.015			5.00	0.015
	5.00	0.025			5.00	0.025			5.00	0.025
	5.00	0.035			5.00	0.035			5.00	0.035
	7.00	0.015		7.00	0.015			7.00	0.015	
15	7.00	0.025		30	7.00	0.025		60	7.00	0.025
	7.00	0.035			7.00	0.035			7.00	0.035
	9.00	0.015			9.00	0.015			9.00	0.015
	9.00	0.025			9.00	0.025			9.00	0.025
	9.00	0.035			9.00	0.035			9.00	0.035

表-1 実験条件の一覧 (全ての実験条件において,*i*=1/250,*D_{rm}*=0.8mとする)





図-1 論文中の記号の定義

図-2 実験装置概要 (単位は mm)

に長さ4m,勾配 3/20の斜面区間を設け,勾配可変区間 の河床全体を0.6m 底上げした点である.これは,より 実河川への波の浸入に近い条件で実験を行うことを目的 として設置したものである.下流端の固定勾配区間には 排水機構と,最長造波周期10s,造波可能最大水深0.8m のコンピュータ制御のパドル型造波機を備えている.

水位変化の計測に関しては,図-2に記したように5m 間隔に配置した容量式波高計(ケネック製)を用い,計測 間隔は0.02sと設定した.







図-5 各計測地点における水位上昇率 (凡例中の*は砕波したことを示す)

2.2 実験条件

実験条件は表-1 に示したような 27 通りを設定した. 全ての実験条件において河床勾配*i*は 1/250,河口部水深 *D_m*は 0.8mと設定した.なお,入射波が流れから受ける 影響を相対的に把握することを目的に,静水時の実験も 併せて行った.

また,ゲートの急開などによる造波では波形の再現性 の保持や制御が難しいために,今回の実験では下流端か らの入射波の造波に際しては図-2内のパドル型造波機 を用いた.入射波の波形はsin²の上に凸の半周期の孤立波 型とし,この波の目標波高 "sを 0.015,0.025,0.035m, 周期T_iを5,7,9sと各3通りを設定した.本文中での周 期とは,定常流水位が一度隆起した後,再び定常水位に 戻るまでの時間を意味する.今回の実験における Manningの粗度係数は0.020~0.022であり,水路底面の 材質は敷設された人工芝である.



2.3 実験結果

実験結果のうち,時間ごとの波形変化を整理したもの の一例が図-3,砕波した場合の時間波形の一例を示した ものが図-4,各計測地点における水位上昇率を流量ごと に整理したものが図-5,水位上昇率とFr数に着目し整理 したものが図-6,各実験条件においてX=0.00(ch.1)で観 測された波高を 0,各観測点での定常水深をD₀(x)とし,

 $_{0}$ を $D_{0}(x)$ で除した無次元量 $_{0}/D_{0}(x)$ に着目し整理した ものが図-7 である.以降,この無次元量を波高水深比 と呼ぶ.また,今回の実験における水位上昇率とは,X =0.00(ch.1)で観測された波高 $_{0}$ と、各観測点で観測され た最大波高 $_{max}(x, t)$ との比, $_{max}(x, t)/_{0}$ を意味してい る.その他論文中での記号に関しては,図-1 での定義に 従う.

なお,砕波の発生については入射波の発生時間と同時 に時間計測を始めるプログラムを利用し,入射波の遡上 を目視で追跡して確認しながら,砕波した時間を計測し た.その結果いくつかの実験条件において砕波が確認さ れ,砕波した場合については表-2にまとめた.表-2にお ける Point とは砕波した際に入射波が通過した波高計の



図-7 波高水深比に着目した水位上昇率 (グラフ内左から _{ts}=0.015, 0.025, 0.035[m]の順に表記)

位置を, Time は砕波時間を示しており,*は一度砕波が 発生した後に再び砕波前の状態に戻った場合を示してい る.波形の比較のために,図-3で砕波が発生しなかった 際の時間波形図を,図-4は砕波が発生した際の中の時間 波形図を示した.図-4中の網掛け部分は,その部分が砕 波区間であることを示している.

3.考察

3.1 時間ごとの波形変化の特性

入射波の遡上に伴う波形の変形に関して,実施したい ずれの実験条件においても遡上の過程において波形が明 瞭に変化し,1つの波峰が2つ以上の波峰に分かれる波 数分散現象が生じた.

まず,全般的な特徴として、入射された波動は流量の 規模に応じた影響を受けて遡上速度が低下するとともに, 最長浸入距離が短くなることが挙げられる.つぎに、波 数分散現象に着目すると,流量が大きくなるにつれて波 峰間距離が長くなり,波が変形を始める時間が早くなっていた.これは,浅水変形が始まってから完了するまでの時間が相対的に短くなることで,波数分散現象の持続時間が長くなるためであると考えられる.

3.2 波形の変形に伴う水位上昇率

一般に浅水波に分類される波動現象では,伝播過程で 浅水変形により波高及び波形が変化する.また,その変 化の程度は流れの有無によって大きく異なる.その特性 について図-5から図-7に示すように整理した.

これらの図より,流れが存在しない場合でも最大 2.5 倍程度,流れがある場合上昇率はさらに増加し,最大で 3 倍以上にまで水位は上昇することが確認された.これ までに行われてきた静水中及び水平床条件下での研究で は,水位上昇は2倍程度と言われてきたが,今回の実験 結果ではそれを上回る水位上昇が観測された.こうした 結果は,浅水変形と波数分散現象の相互作用により引き 起こされているものであると考えられる.

ここで,同一流量で入射波の条件が異なる場合の結果 を比較するため,図-7に着目してみる.同一流量,同一 周期の入射波同士を比較してみた場合,波高が大きいも のほど水位上昇率の伸びが大きいことがわかる.これは 同一周期の波の場合,波高が大きいほど入射波前面の水 面の曲率が大きくなる.つまり,波数分散現象が発生し やすいということである.波高が同一で周期が異なる波 の場合に,周期の短い波のほうが周期の長いものと比べ て水位上昇率が大きいのも同様の理由であると考えられ る.

いずれの実験条件においてもこれまでの知見に比べて より大きな水位上昇が確認された一方,流量ごとに観測 された水位上昇率の最大値と最小値の差を平均してみる と,Q=0[/s]では 0.923,Q=15[/s]で 1.29,Q=30[/s]で 1.49,Q=60[/s]で2.17となった.このことから,流量が 大きくなることで水位変動が大きくなると考えられる.

また,表-2,図-4に記したようにいくつかの実験条件 において砕波が確認された.そこで砕波した時点での波 高水深比に着目すると,おおよそ。/D₀(x)=0.24前後で砕 波していることがわかった.ここでの波高。とは水面か ら波頭までの高さである.

4.おわりに

今回の実験を通して,得た結論は以下である. 波状段波に関する水理実験を行った結果,水位上昇率 は静水時でおおよそ2倍,流れが存在する条件下では最 大で3倍程度まで増加するという結論を得た.これはこ れまでに知られている数値よりも大きなものである.

入射波の条件が同一であれば,流量が大きいほど水位 変動の程度は大きくなる傾向にある.

入射波の波高が同一ならば周期が短いほど,周期が同 一ならば波高が高いほど水位上昇率は大きくなる. 謝辞:本研究は国土交通省北海道開発局,北海道河川防 災研究センターからの支援を受けて実施されている.こ こに記して謝意を表します.

参考文献

- 500 (1) 安田 浩保,渡邊 康玄,藤間 功司:2003年9月の 十勝沖地震に伴い発生した津波の河川遡上,土木学 会論文集,No.768/ -68,pp.209-218,2004.
- Favre, H. :Etude theorique et experimental des on –des de translation dans les canaux decouverts. Dunod, p.150., 1935.
- Keulegan, G.H. and Patterson, G.W. : Mathematical theory of irrotational translation waves, J. Res. Nat. Bur. Standards., Vol.24, pp.47-101, 1940.
- Jonhson, R.S. : A non-linear equation incorporating damping and dispersion, J Fluid Mech., Vol.42, pp.49-60, 1970.
- Johnson, R.S.: Shallow Water Waves on a Viscous Fluid

 The Undular Bore, Phys. Fluids, Vol.15, No.10, pp1693-1699, 1972.
- 6) Peregrine, D.H. : Calculations of the development of an undular bore, J. Fluid Mech., Vol.25, pp321-330, 1966.
- 7) 室田 明,岩田好一郎:段波の変形に関する研究,土
 木学会論文集,第160号,pp.49-58,1971.
- 8) 松富 英夫:移動跳水 (波状段波非)発生条件の検討,
 第 33 回水理講演会論文集, pp.271-276, 1989.
- 9) 佐藤 道郎:不等流を遡る波の波高変化に関する基礎 的研究,土木学会論文報告集,第242号,pp.15-29, 1975.
- 10) 安田 浩保,山田 正,後藤 智明:スルースゲートの 閉鎖に伴い発生する段波の水理実験とその数値計算, 土木学会論文集,No.733/ -63,pp.89-105,2003.